

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## بررسی تاثیر کسر حجمی نانو ذرات $B_4C$ بر فوم نانو کامپوزیتی آلومینیوم - $B_4C$ تولید شده توسط روش متالورژی پودر - عامل فضا ساز

محمد رضا مرادی<sup>۱</sup>، احمد مولودی<sup>۲</sup>، علی حبیب اله زاده<sup>۳</sup>

### چکیده

در این تحقیق، فوم نانو کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانو ذرات کاربید بر ( $B_4C$ ) با درصدهای حجمی مختلف تقویت کننده، شامل 0/5، 1، 1/5، 2 و 2/5 با بهره گیری از روش متالورژی پودر - عامل فضا ساز تولید شد. عامل فضا ساز در این تحقیق، ذرات کاربامید  $(NH_2)_2CO$  با شکل کروی و اندازه بین 2-2/3 mm انتخاب شدند. همچنین تاثیر افزایش کسر حجمی نانو ذرات  $B_4C$  بر رفتار مکانیکی و فشار متراکم سازی نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار بهینه این عوامل تعیین گشت. علاوه بر آن برخی از مقادیر عددی تعیین گشته این عوامل با فوم آلومینیومی کامپوزیت نشده مقایسه شد. نتایج حاصل حاکی از آن بود که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات  $B_4C$  از 0/5 به 2 درصد حجمی، ظرفیت جذب انرژی نمونه از  $9/74 MJ/m^3$  به  $11/47 MJ/m^3$  افزایش ولی در مقادیر بیش از 2 درصد حجمی، کاهش می یابد. علاوه بر آن مقدار استحکام تسلیم نمونه از 19/10 MPa به 23/90 MPa افزایش، ولی در مقادیر بیش از 2 درصد حجمی، تغییر چندانی نداشته است. همچنین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات  $B_4C$  از 0/5 به 2/5 درصد حجمی، فشار متراکم سازی بهینه از 310 MPa به 370 MPa افزایش یافت.

**واژه های کلیدی:** فوم نانو کامپوزیتی، فشار متراکم سازی، عامل فضا ساز، ظرفیت جذب انرژی.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه سمنان

mohammadreza.moradi@semnan.ac.ir

2- هیئت علمی گروه پژوهش مهندسی مواد و متالورژی جهاد دانشگاهی مشهد

3- دانشیار دانشکده مهندسی مواد دانشگاه سمنان

## مقدمه

سابقه بکارگیری فوم های فلزی به بیش از نیم قرن می رسد [1]، با این حال همواره این مواد به عنوان خانواده ای از مواد نو به شمار می روند که با توجه به ویژگی های منحصر به فرد، امکاناتی زیاد برای توسعه در سال های آینده خواهند داشت [2]. ویژگی هایی از قبیل ظرفیت جذب انرژی<sup>1</sup> بالا، دانسیته نسبی پایین و خواص فیزیکی (عایق صوتی و حرارتی) مناسب [3-6]. وجود این ویژگی های منحصر به فرد کاربرد این مواد را در مهندسی پزشکی و تولید، صنایع هوافضا و حمل و نقل و سایر صنایع به طور گسترده در کشورهای صنعتی گسترش می دهد [1-3].

طیف وسیعی از فرآیندها در تولید فوم های فلزی از جمله، فرآیندهای حالت مایع و فرآیندهای مربوط به رسوبات الکتروشیمیایی وجود دارد. ولی در این میان فرآیند متالورژی پودر - عامل فضا ساز (PM/SH)<sup>2</sup> روشی نسبتاً آسان، مقرون به صرفه و با قابلیت انعطاف پذیری بالا، میل به فوم سازی با بهره گیری از این روش را در تولید فوم های فلزی افزایش می دهد [2-3, 7]. در این روش، استفاده از عامل فضا ساز کاربامید رایج و قابل توجه است [8]. بر طبق تحقیقات صورت گرفته [7]، با بهره گیری از این روش می توان به فوم های سلول باز با تخلخل تا 80 %، همزمان با نتایج مکانیکی و ساختاری قابل قبول دست یافت.

بالا بودن ظرفیت جذب انرژی در فوم های فلزی، از مهمترین خواص این مواد به شمار می آید. لذا دستیابی و تولید فوم هایی با بیشترین تنش پایا<sup>3</sup> و کرنش چگالش<sup>4</sup> الزامی است. این الزام در تولید فوم های فلزی، نیازمند تولید آنها به صورت کامپوزیتی و به تبع افزایش استحکام دیواره های سلولی می باشد [2, 9]. از این رو محققان زیادی به ساخت فوم های فلزی کامپوزیت شده با ذرات تقویت کننده از قبیل  $Al_2O_3$  [9]،  $ZrO_2$  [10]، و  $SiC$  [11-12] پرداخته اند.

کاربید بر ( $B_4C$ ) ماده ای سرامیکی است که به عنوان یک ذره تقویت کننده در کامپوزیت سازی با توجه به خواص منحصر بفرد از قبیل: قابلیت جذب نوترون بالا ( $\sim 600 \text{ barn}$ )، دانسیته پایین ( $\sim 2/52 \text{ g cm}^{-3}$ )، سختی فوق العاده بالا ( $\sim 30 \text{ GPa}$ )، نقطه ذوب بالا ( $2427^\circ \text{C}$ )، و همچنین استحکام و مقاومت سایشی بالا، کاربرد فراوانی در صنایع هسته ای، نظامی، ابزار سازی، تراشکاری و سایر صنایع دارد [13-15].

در این تحقیق به تولید فوم نانو کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانو ذرات کاربید بر  $[NC(Al-B_4C)F]$ <sup>5</sup>، با درصدهای حجمی مختلف از تقویت کننده، شامل 0/5، 1، 1/5، 2 و 2/5، با بهره گیری از روش PM/SH

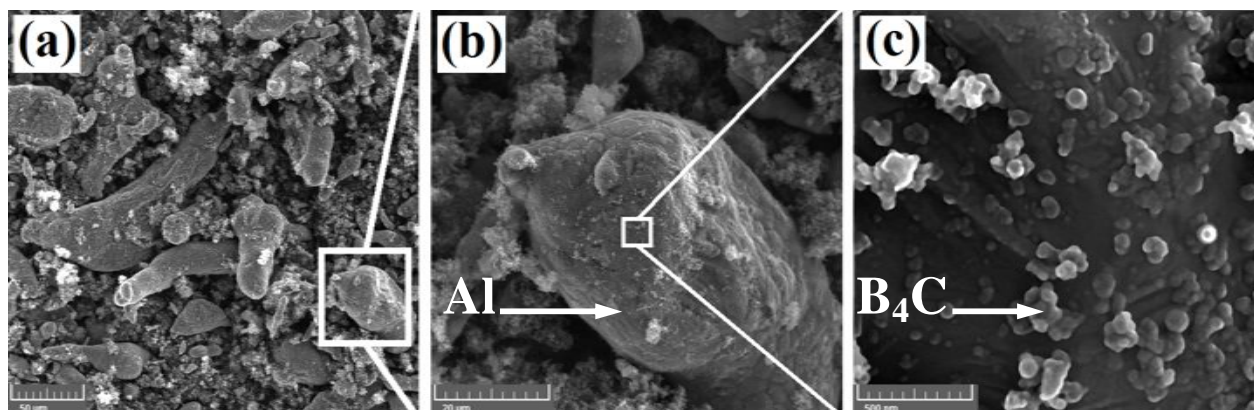
1- Energy absorbtion

2- Powder Metallurgy-Space Holder

3- Plateau Stress

4- Strain densification

5- Nano-Composite  $Al-B_4C$  Foam



شکل 1. تصاویر FESEM مربوط به (a) مخلوط پودر آلومینیوم و نانو ذرات  $B_4C$ ، (b) تک ذره پودر آلومینیوم، (c) ذرات  $B_4C$  قرار گرفته بر سطح تک ذره پودر آلومینیوم.

پرداخته شده است. همچنین تاثیر افزایش کسر حجمی نانو ذرات  $B_4C$  بر رفتار مکانیکی و فشار متراکم سازی نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار بهینه این عوامل تعیین گشت.

## مواد و روش تحقیق

### مواد اولیه و تولید

اطلاعات و مشخصات مواد اولیه به کار رفته در تولید نمونه های  $NC(Al-B_4C)F$ ، در جدول (1) بیان شده است. پودر آلومینیوم به کار رفته در این تحقیق به شکل ذرات نامنظم میله ای [16] می باشد. در فشار متراکم سازی ثابت، تراکم این ذرات نسبت به ذرات کروی شکل با توجه به بالا بودن سطح تماس، بیشتر است [17]. همچنین از نانو ذرات  $B_4C$  در مقادیر بین  $2/5 - 0/5$  درصد حجمی و ذرات کاربامید کروی شکل با اندازه ذرات بین  $2 - 2/3$  mm استفاده شد. شکل (1) تصاویر مخلوط پودر آلومینیوم و نانو ذرات  $B_4C$  را نمایش می دهد.

جدول 1. مشخصات مواد اولیه به کار رفته در تولید  $NC(Al-B_4C)F$

ماده	خلوص شیمیایی	اندازه ذرات	مقدار
پودر آلومینیوم	99/5 %	$< 45 \mu m$	51 wt %
کاربامید	----	2 - 2/3 mm	45 wt %
پودر منیزیم	99/6 %	$< 5 \mu m$	2 wt %
پودر قلع	99/6 %	$< 10 \mu m$	2 wt %
اتانول	----	----	2/5 vol %
کاربید بر	99/0 %	$< 50 nm$	0/5 - 2/5 vol %

در این تحقیق ذرات پودر آلومینیوم و  $B_4C$  همراه با پودر قلع و منیزیم به منظور تسهیل فرآیند تف جوشی فاز

مایع<sup>1</sup> [7,18-19]، با استفاده از مخلوط کن دوار<sup>2</sup> به طور کامل مخلوط شدند، سپس مخلوط پودری حاصل با ذرات کاربامید (با چگالی برابر با  $1/33 \text{ g cm}^{-3}$ ، دمای ذوب  $1303^\circ \text{C}$ ، دمای تجزیه  $133^\circ \text{C}$  و قابلیت انحلال در آب  $20^\circ \text{C}$  برابر با  $1000 \text{ g/lit}$ ) همراه با  $2/5$  درصد حجمی اتانول، به منظور ایجاد لایه چسبنده بر سطوح ذرات کاربامید و جلوگیری از جدایش با سایر مواد تشکیل دهنده مخلوط [7,18-19] به مدت زمان 50 دقیقه مخلوط شدند. در نهایت مخلوط مواد تهیه شده درون قالب فولادی (شکل 3) آغشته شده به ماده روانساز اسید استتاریک به منظور کاهش اصطکاک بین پودر در حال پرس و جداره قالب، فشرده سازی شد [17].

### فشار بهینه متراکم سازی

با بهره گیری از محاسبات تئوری و مشاهدات عملی، فشار بهینه متراکم سازی ( $\sigma$ ) تعیین می گردد. با استفاده از رابطه (1) می توان این مقدار را محاسبه نمود [21].

$$\sigma = x \sigma_{sh} + [1 - x] \sigma_m \quad (1)$$

که در این رابطه، ( $x$ ) کسر حجمی عامل فضا ساز، ( $\sigma_{sh}$ ) استحکام عامل فضا ساز و ( $\sigma_m$ ) استحکام پودر زمینه می باشد. در این تحقیق فشار بهینه متراکم سازی توسط ارزیابی چشمی تعیین شد. علاوه بر این بهره گیری از روش های آزمون میکروسختی سنجی [22]، ارزیابی انقباض<sup>3</sup> و آزمون فشرده سازی [23] نیز در تعیین مقدار بهینه فشار متراکم سازی کاربرد دارد.

### انحلال و تفجوشی

حذف ذرات عامل فضا ساز کاربامید از داخل نمونه خام متراکم شده به دو روش تجزیه حرارتی [9] و انحلال در آب [7,18-19] امکان پذیر است. در این تحقیق به منظور حذف ذرات کاربامید از داخل نمونه های خام  $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$  تولید شده، از روش انحلال در آب با دمای تقریباً  $21^\circ \text{C}$ ، به مدت زمان  $3/5$  ساعت به منظور اطمینان کامل از حذف این ذرات از داخل نمونه استفاده شد. حذف این ذرات تا رسیدن وزن قطعه به یک مقدار ثابت، باید ادامه یابد [7]. بعد از این عملیات، نمونه ها در دمای  $60^\circ \text{C}$  به مدت زمان 3 ساعت درون کوره الکتریکی قرار داده شد تا کاملاً رطوبت موجود در آن حذف گردد. در نهایت نمونه های  $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$  تولید شده در دمای  $650^\circ \text{C}$  به مدت زمان 3 ساعت برای عملیات تفجوشی درون کوره قرار داده شد.

### چگالی و تست فشار

1- Liquid phase sintering  
2- Rotary mixer  
3- Shrinkage



چگالی  $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$  تولید شده ( $\rho_F$ ) توسط رابطه (2) محاسبه شد [9]. که در آن ( $\rho_{Al} = 2/7 \text{ Kg/m}^3$ )

می باشد.

$$\rho_F = 1 - (\rho_F/\rho_{Al}) \times 100 \quad (2)$$

همچنین تست فشار توسط دستگاه تست فشار سنتام با نرخ حرکت دهانه دستگاه 1 mm/min بر روی  $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$  تولید شده، مطابق استاندارد ASTM E9-09 انجام پذیرفت. لازم به ذکر است برای جلوگیری از ایجاد تنش سه بعدی مابین دهانه دستگاه و نمونه ها از روانکار استفاده شد [24]. علاوه بر این، تعیین ظرفیت جذب انرژی که برابر با سطح زیر منحنی تنش- کرنش فشاری حاصل از تست فشار قبل از شروع منطقه چگالش<sup>1</sup> می باشد، در محدوده کرنش بین 0 - 60% توسط رابطه (3) محاسبه شد [7, 24].

$$w = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

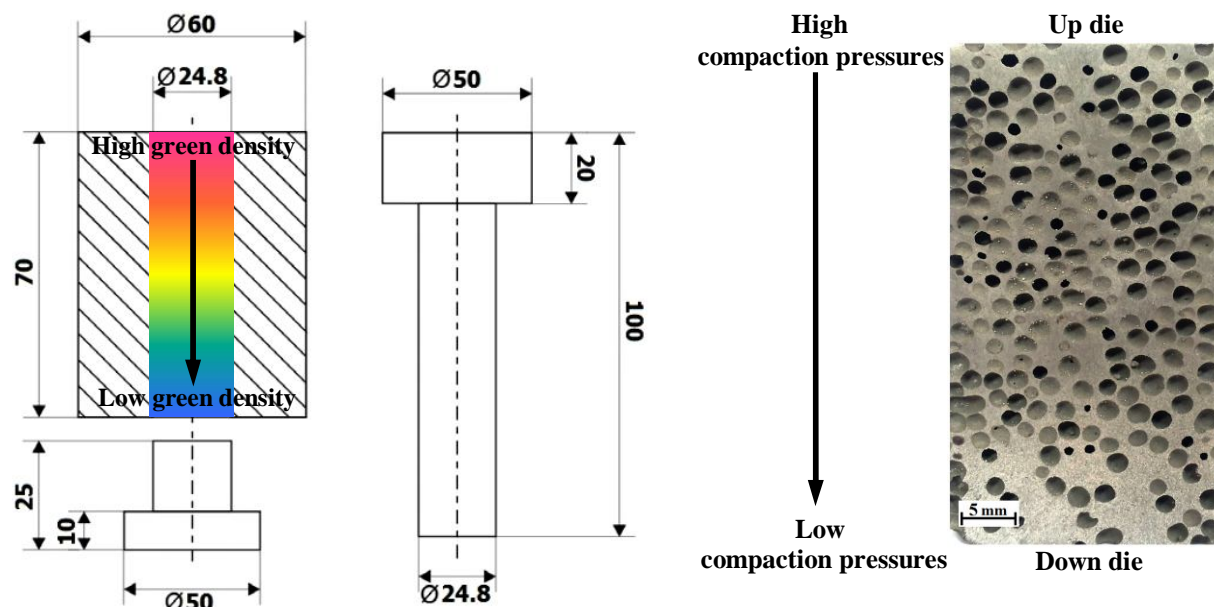
که در این رابطه ( $\varepsilon$ ) و ( $\sigma$ ) به ترتیب برابر با کرنش چگالش و تنش فشاری می باشد.

## نتایج و بحث

### فشار بهینه متراکم سازی در تولید $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$

با اعمال فشار متراکم سازی بر ذرات تشکیل دهنده  $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$  تولید شده، فضاهای خالی مابین آنها در اثر آرایش مجدد پر شده و در ادامه با تغییر شکل، عدد همسایگی و سطح مشترک ذرات پودر زمینه (آلومینیوم) افزایش می یابد، بطوری که در نهایت منجر به فشردگی و تشکیل نمونه خام می گردد [17, 20-21]. فشار متراکم سازی بهینه در  $\text{NC}(\text{Al-B}_4\text{C})\text{F}$  تولید شده، با 2 درصد حجمی نانو ذرات  $\text{B}_4\text{C}$  در این تحقیق، 360Mpa تعیین شد. در مقادیر بیش از 360Mpa، با وجود افزایش استحکام خام و چگالی خام و کاهش میکرو تخلخل ها [21]، فشار متراکم سازی از حد الاستیک و استحکام بحرانی ذرات کاربامید تجاوز می کند و این ذرات و به تبع حفرات حاصل از آن در نمونه، از حالت کروی به بیضوی تغییر شکل داده و در ادامه خرد می شوند (شکل 2) [21, 25]. لذا علاوه بر تضعیف خواص مکانیکی و ایجاد خواص ناهمسانگردی در نمونه، قابلیت انحلال کامل در آب را از دست داده و با محبوس شدن در نمونه [21] در حین تف جوشی منجر به ایجاد ترک در نمونه می شوند [7]. علاوه بر این با توجه به مطلب اخیر مشخص شد که با تجاوز فشار متراکم سازی از مقدار بهینه، ظرفیت جذب انرژی در راستای اعمال فشار به دلیل تغییر شکل حفرات از کروی به بیضوی، کاهش می یابد [26]. همچنین با افزایش فشار متراکم سازی، تنش شعاعی و اصطکاک دیواره های قالب نیز افزایش می یابد، در نتیجه گرادیان چگالی نمونه خام در راستای عمودی و افقی

1- Densification region



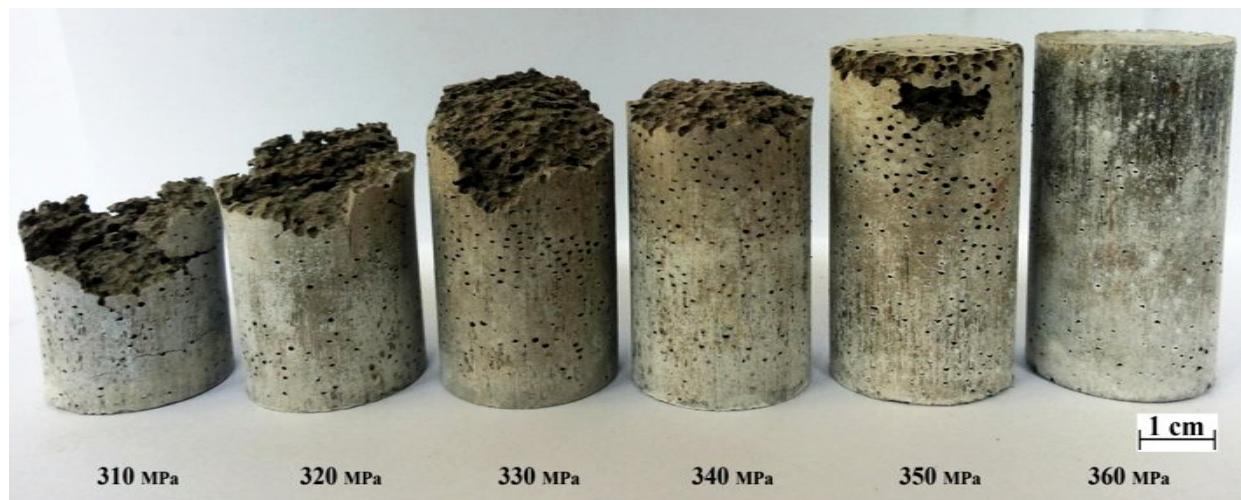
شکل ۳. قالب متراکم سازی به کار رفته در تولید NC(AI-B<sub>4</sub>C)F و نمایش چگونگی ایجاد گرادیان چگالی عمودی در نمونه خام.

شکل ۲. مقطع طولی NC(AI-B<sub>4</sub>C)F که در اثر اعمال بهینه فشار متراکم سازی شکل کروی حفرات محفوظ باقی مانده است.

تشدید می گردد و در اثر آن ناهمگنی استحکام خام، ناهمگنی چگالی خام، ناهمگنی توزیع ذرات عامل فضا ساز، تغییرات ابعادی نمونه در تف جوشی و تضعیف خواص مکانیکی دیواره های سلولی افزایش می یابد. از طرفی با توجه به شکل (۴) چنانچه فشار متراکم سازی کمتر از مقدار بهینه باشد، نمونه صلابت و استحکام لازم را در ادامه مراحل فرآیند PM/SH نخواهد داشت، بطوری که در مرحله حذف عامل فضا ساز از نمونه، ذرات تشکیل دهنده نمونه با توجه به گرادیان چگالی نمونه خام (شکل ۳)، در مناطقی با کمترین مقدار استحکام خام و چگالی خام ریزش خواهد کرد. با توجه به شکل (۳)، همواره در قالب های تک محوره، بخشی از فشار متراکم سازی اعمال شده بر ذرات تشکیل دهنده نمونه صرف غلبه بر اصطکاک دیواره قالب می شود. لذا کاهش نسبت ارتفاع به قطر قالب و استفاده از عامل روان ساز از مقدار اصطکاک دیواره قالب و به تبع گرادیان چگالی نمونه خام می کاهد [17,20,25].

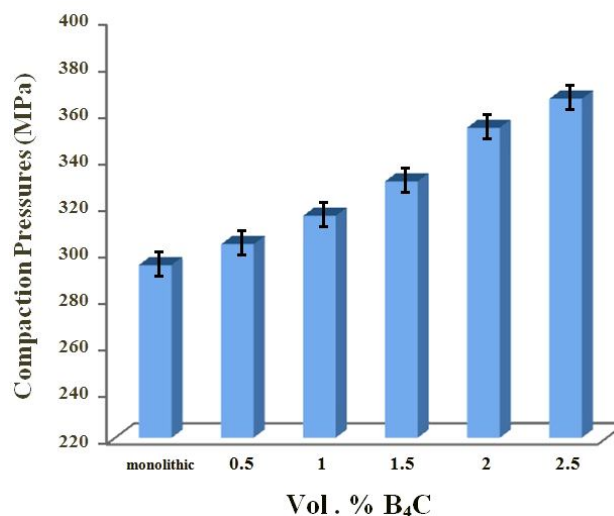
### تاثیر افزایش کسر حجمی نانو ذرات B<sub>4</sub>C بر فشار متراکم سازی بهینه در تولید NC(AI-B<sub>4</sub>C)F

در فرآیندهای PM و PM/SH، رفتار متراکم شوندگی ذرات تشکیل دهنده نمونه، وابسته به نوع ماده و مورفولوژی آن بوده و تغییر شکل ذرات عامل فشردگی محسوب می گردد [17,20]. با توجه به شکل (۵)، افزایش درصد حجمی نانو ذرات B<sub>4</sub>C در NC(AI-B<sub>4</sub>C)F تولید شده، منجر به افزایش فشار متراکم سازی بهینه در تولید آن می شود. زیرا نانو ذرات B<sub>4</sub>C با توجه به ماهیت سخت خود، تمایل کمتری به تغییر شکل و فشردگی نسبت به ذرات پودر آلومینیوم دارند. از طرفی ابعاد نانو ذرات B<sub>4</sub>C بسیار کمتر از ذرات پودر آلومینیوم است، لذا با کاهش



شکل 4. نمونه های NC(Al-B4C)F تهیه شده پس از حذف عامل فضا ساز تحت فشارهای مختلف متراکم سازی.

ابعاد ذرات، مقاومت آنها در برابر تغییر شکل و فشردگی افزایش می یابد. از طرفی با توجه به لزوم افزایش فشار متراکم سازی در تولید نمونه هایی با درصد حجمی بالا از نانو ذرات  $B_4C$ ، تغییر شکل پلاستیک ذرات پودر آلومینیوم و به دنبال آن ایجاد کارسختی و افزایش تصاعدی استحکام تسلیم (با توجه به افزایش دانسیته نابجایی ها در ذرات پودر) این ذرات تشدید می گردد. بطوری که عامل اخیر مانعی برای تغییر شکل و فشردگی ذرات پودر آلومینیوم محسوب می گردد. لذا غلبه بر این عامل ملزوم افزایش بیشتر فشار متراکم سازی می باشد. به عبارتی در درصدهای حجمی بالا از نانو ذرات  $B_4C$  به فشار بهینه متراکم سازی بیشتری نیاز است. زیرا علاوه بر غلبه به مقاومت نانو ذرات  $B_4C$  در برابر تغییر شکل و فشردگی، بر کارسختی و رشد تصاعدی استحکام تسلیم ذرات پودر آلومینیوم



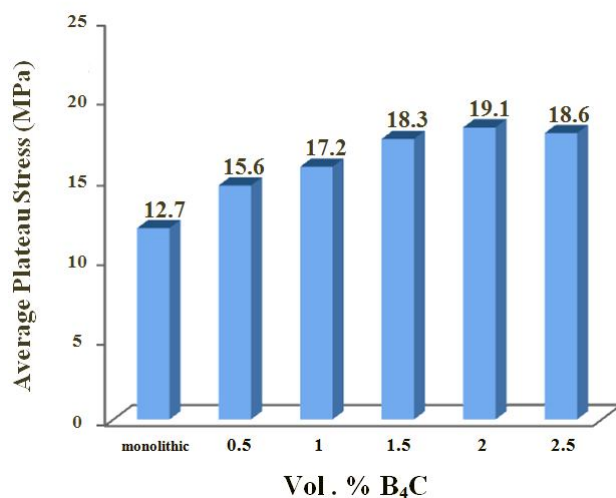
شکل 5. نمودار فشار متراکم سازی بهینه - کسر حجمی نانو ذرات  $B_4C$ .



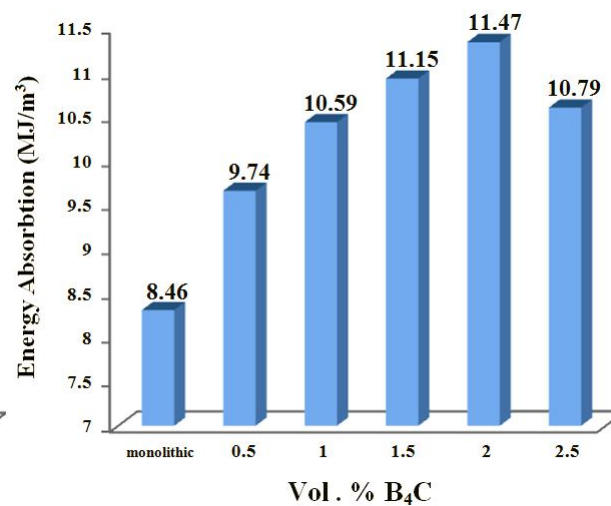
در فشارهای متراکم سازی بالا نیز باید غلبه نمود [17,20]. لذا با توجه به محدودیت بیان شده در افزایش فشار متراکم سازی، بهره گیری از ذرات پودر آلومینیوم با اشکال نامنظم به دلیل میل بیشتر به قفل شدگی مکانیکی و استفاده از چسب در مخلوط ذرات تشکیل دهنده نمونه ضرورت می یابد [20,25].

### تأثیر کسر حجمی نانو ذرات $B_4C$ بر رفتار مکانیکی $NC(Al-B_4C)F$ تولید شده

استحکام فشاری و خواص مکانیکی فوم های فلزی کامپوزیت شده به عوامل مختلفی بستگی دارند، بطوریکه با تغییر هر یک از این عوامل، میزان استحکام فشاری و یا به عبارتی نسبت استحکام به وزن آنها تغییر می کند. یکی از مهمترین این عوامل، کسر حجمی ذرات تقویت کننده می باشد [9,27]. در این تحقیق تست فشار بر روی  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده و فوم آلومینیومی کامپوزیت نشده (MAF)<sup>1</sup> تحت شرایط تکنولوژیکی یکسان و با درصد های حجمی متفاوت از نانو ذرات تقویت کننده  $B_4C$  انجام پذیرفت. نتایج حاصل از اعمال تست فشار نشان داد که نمودار تنش - کرنش  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده همانند سایر فوم های فلزی از سه منطقه تغییر شکل خطی<sup>2</sup>، منطقه تغییر شکل پایا<sup>3</sup> و منطقه چگالش تشکیل شده است. می توان گفت به طور کلی منحنی های تنش - کرنش در تست فشار فوم های فلزی از مناطق ذکر شده تبعیت می کند، اما با توجه به نوع فوم های فلزی و خواص منحصر به فردشان می تواند دارای ظرفیت جذب انرژی، استحکام تسلیم<sup>4</sup>، تنش پایا متوسط، تنش چگالش<sup>5</sup> و کرنش چگالش



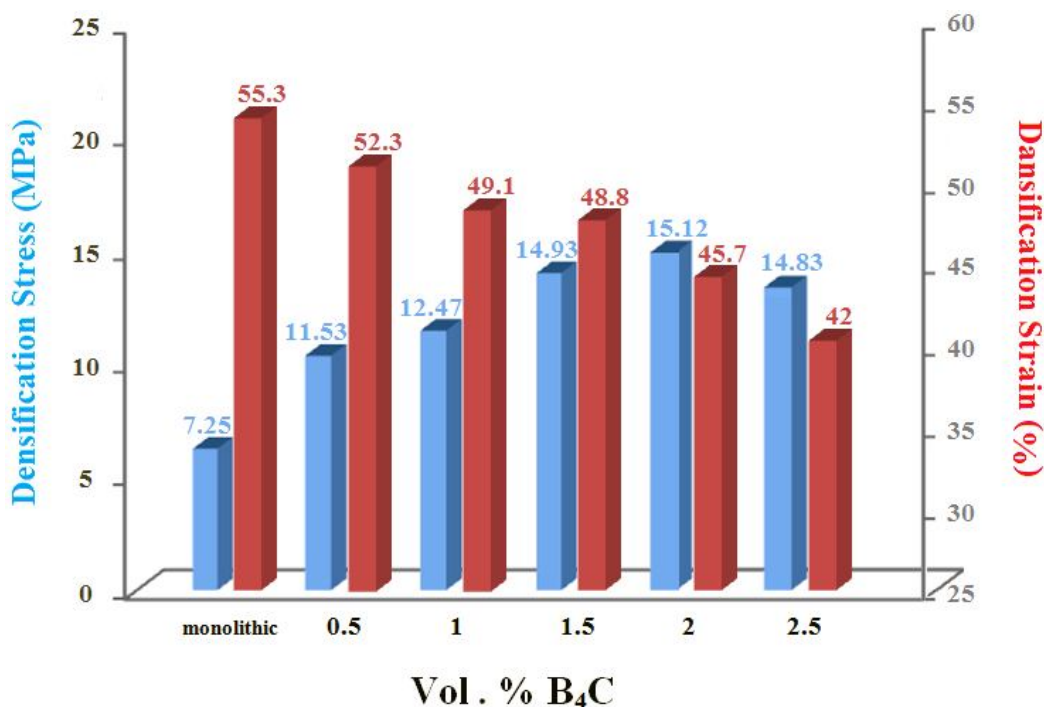
شکل 7. تنش پایا متوسط  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده در کسر های حجمی مختلف از نانو ذرات  $B_4C$ .



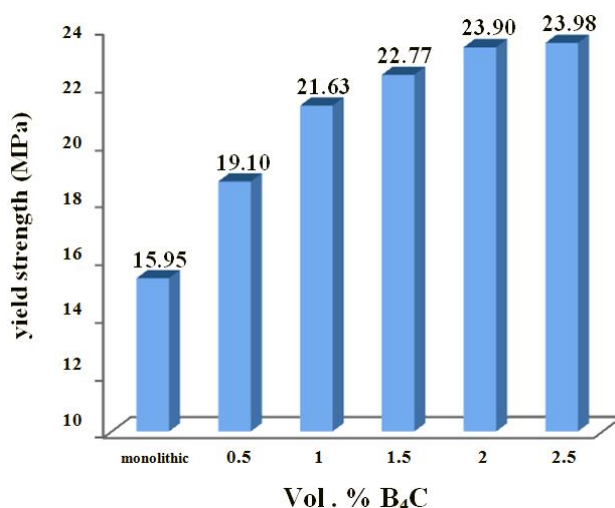
شکل 6. ظرفیت جذب انرژی  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده در کسر های حجمی مختلف از نانو ذرات  $B_4C$ .

- 1- Monolithic aluminum foam
- 2- Linear -deformation region
- 3- Plateau deformation region
- 4- Yield strength
- 5- Stress densification

متفاوتی نسبت به یکدیگر باشند. بطور کلی پارامترهای موثر بر استحکام فشاری فوم‌های فلزی کامپوزیت شده، ظرفیت جذب انرژی آنها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، این دو با هم ارتباط مستقیمی دارند [2-3]. در این تحقیق استحکام تسلیم، تنش پایا متوسط، تنش چگالش و کرنش چگالش به عنوان عوامل تعیین کننده ظرفیت جذب انرژی نمونه‌های تولید شده مورد ارزیابی واقع شد. نتایج حاصل از تست فشار حاکی از آن است که با افزودن نانو ذرات تقویت کننده  $B_4C$  به MAF تولید شده به مقدار 2 درصد حجمی، ظرفیت جذب انرژی از  $8/46 \text{ MJ/m}^2$  به  $11/47 \text{ MJ/m}^2$  افزایش ولی در مقادیر بیش از 2 درصد حجمی، کاهش می‌یابد (شکل 6). همچنین تنش پایا متوسط از  $12/7 \text{ MPa}$  به  $19/1 \text{ MPa}$  افزایش ولی در مقادیر بیش از 2 درصد حجمی، کاهش می‌یابد (شکل 7). لذا با توجه به مطلب اخیر و نتایج حاصل از نمودار شکل (8)، مقدار بهینه افزودن نانو ذرات  $B_4C$ ، 2 درصد حجمی تعیین شد. نتایجی مشابه با این تحقیق نیز توسط علیزاده و همکاران [21] در ساخت فوم آلومینیومی تقویت شده با ذرات  $Al_2O_3$  گزارش شده است. طبق این تحقیق، نرخ کاهش ظرفیت جذب انرژی و تنش پایا متوسط در مقادیر بیش از 2 درصد حجمی  $Al_2O_3$ ، وابسته به درصد تخلخل در نمونه می‌باشد، بطوریکه در نمونه‌هایی با تخلخل 70٪، نرخ کاهش ظرفیت جذب انرژی و تنش پایا متوسط ثابت باقی می‌ماند. نتایج حاصل از آنالیز نقطه‌ای (EDS) و میکرو ساختار  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده با 2 درصد حجمی نانو ذرات  $B_4C$  پس از تف جوشی کامل، بیانگر تجمع یکنواخت نانو ذرات  $B_4C$  در مرز ذرات پودر آلومینیوم تشکیل دهنده دیواره‌های سلولی نمونه می‌باشد. وجود نانو



شکل 8. کرنش چگالش و تنش چگالش  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده در کسرهای حجمی مختلف از نانو ذرات  $B_4C$ .



شکل 9. استحکام تسلیم NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده در کسرهای حجمی مختلف از نانو ذرات B<sub>4</sub>C.

ذرات B<sub>4</sub>C در دیواره‌های سلولی NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده، منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی، تنش پایا متوسط، استحکام تسلیم، تنش چگالش و کرنش چگالش نسبت به MAF می‌شود. بنابراین دیواره سلولی در NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده نسبت به MAF مشابه از خواص استحکامی بیشتر برخوردار هستند. از طرفی با توجه به حضور نانو ذرات تقویت کننده B<sub>4</sub>C در دیواره‌های سلولی NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده نسبت به MAF، ضخامت نهایی دیواره‌های سلولی مقدار کمی افزایش می‌یابد. البته عامل اخیر در افزایش خواص مکانیکی NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده تاثیر ندارد. درحالی که بهره‌گیری از میکرو ذرات تقویت کننده، افزایش بیشتری در ضخامت نهایی دیواره‌های سلولی به دنبال خواهد داشت [28]. برای فوم‌های فلزی پیک اول تنش روی منحنی تنش-کرنش بصورت استحکام تسلیم تعریف می‌شود [3]. با توجه به شکل (9)، استحکام تسلیم MAF تولید شده، 15/95 Mpa تعیین شد. در حالی که با افزودن نانو ذرات تقویت کننده B<sub>4</sub>C به آن، این مقدار افزایش یافته بطوریکه در نمونه‌هایی با 2 درصد حجمی نانو ذرات B<sub>4</sub>C، استحکام تسلیم 23/90 Mpa یعنی حدود 1/5 برابر MAF تعیین گردید. ولی در مقادیر بیش از 2 درصد حجمی نانو ذرات B<sub>4</sub>C، استحکام تسلیم افزایش نیافته و تمایل به پایدار شدن دارد. لذا بیشترین مقدار افزایش استحکام تسلیم مربوط به نمونه‌هایی با 2 درصد حجمی نانو ذرات B<sub>4</sub>C می‌باشد. علت افزایش استحکام تسلیم NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده در اثر افزایش کسر حجمی نانو ذرات B<sub>4</sub>C، علاوه بر میل ذاتی افزایش خواص مکانیکی مواد در حضور ذرات تقویت کننده [29]، با توجه به مطالب بیان شده، اعمال فشار متراکم سازی به ذرات تشکیل دهنده پودر زمینه نمونه NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده منجر به کارسختی و افزایش استحکام تسلیم آن ذرات شده [17,20] و به تبع استحکام تسلیم NC(Al-B<sub>4</sub>C)F تولید شده نیز افزایش می‌یابد.

## نتیجه گیری

- تاثیر کسر حجمی نانو ذرات تقویت کننده  $B_4C$  بر رفتار مکانیکی و فشار متراکم سازی نمونه در تولید فوم نانو کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با درصدهای حجمی مختلف نانو ذرات کاربید بر، مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار بهینه این عوامل تعیین گشت. نتایج حاصل از این ارزیابی به شرح ذیل می باشد:
1.  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده با توجه به بالاتر بودن  $(\sigma_{pl})$  و  $(\epsilon_D)$  نسبت به MAF از محدوده کاربری وسیع تری برخوردار هستند.
  2. دیواره سلولی در  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده نسبت به MAF مشابه، با توجه به حضور نانو ذرات تقویت کننده  $B_4C$  از خواص استحکامی بیشتر برخوردار هستند.
  3. نانو ذرات  $B_4C$  با توجه به ابعاد و سختی فوق العاده بالا، تمایل به تغییر شکل و فشردگی بسیار کمی دارند، لذا به فشار متراکم سازی بیشتری حین تولید  $NC(Al-B_4C)F$  نیاز است.
  4. بیشترین ظرفیت جذب انرژی، استحکام تسلیم و تنش پایا متوسط در  $NC(Al-B_4C)F$  تولید شده با 2 درصد حجمی نانو ذرات  $B_4C$  مشاهده شد.
  5. فشار متراکم سازی بهینه در تولید  $NC(Al-B_4C)F$  با 2 درصد حجمی نانو ذرات  $B_4C$ ، 360Mpa تعیین شد.
  6. تجاوز فشار متراکم سازی از مقدار بهینه منجر به کاهش ظرفیت جذب انرژی در راستای محور اعمال فشار متراکم سازی، به دلیل تغییر شکل حفرات از حالت کروی به بیضوی می شود.

## مراجع

- 1- J. Jakubowicz, G. Adamek, M. Dewidar , "Titanium foam made with saccharose as a space holder" , J Porous Mater , 20, 2013, 1137-1141.
- 2- J. Banhart, Manufacture , "characterisation and application of cellular metals and metal foams" , Prog. Mater Sci , 46, 2001, 559-632.
- 3- M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, Metal foams-a design guide, London, Butterworth-Heinemann, 2000.
- 4- A. Moloodi, R. Raiszadeh , "Fabricating Al foam from turning scraps" , Mater Manuf Processes, 20, 2011, 890-896.
- 5- Z. Sarajan, M. Soltani, J. KahaniKhabushan , "Foaming of Al-Si by  $TiH_2$ " , Mater Manuf Processes , 26, 2011, 1293-1298.

- 6- X.F. Tao, L.P. Zhang, Y.Y. Zhao , "Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres" , Materials and Design , 30, 2009, 2732-2736.
- 7- H. Bafti, A. Habibolahzadeh , "Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters" , Materials and Design , 31, 2010, 4122-4129.
- 8- B. Jiang, N.Q. Zhao, C.S. Shi, X.W. Du, J.J. Li, H.C. Man , "A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process" , Materials Letters , 59, 2005, 3333-3336.
- 9- M. Alizadeh, M. Mirzaei-Aliabadi , "Compressive properties and energy absorption behavior of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite foam synthesized by space-holder technique" , Materials and Design , 35, 2012, 419-424.
- 10- N.Q. Zhao, B. Jiang, X.W. Du, J.J. Li, C.S. Shi, W.X. Zhao , "Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the mechanical properties of open cell aluminum foams" , Materials Letters , 60, 2006, 1665-1668.
- 11- L.Z. Zhao, M.J. Zhao, X.M. Cao, C. Tian, W.P. Hu, J.S. Zhang , "Thermal expansion of a novel hybrid SiC foam-SiC particles-Al composites" , Composites Science and Technology , 67, 2007, 3404-3408.
- 12- U. Soy, A. Demir, F. Caliskan , "Effect of bentonite addition on fabrication of reticulated porous SiC ceramics for liquid metal infiltration" , Ceramics International , 37, 2011, 15-19.
- 13- A.K. Suri, C. Subramanian, J. K. Sonber, T.S.R.Ch. Murthy , "Synthesis and consolidation of boron carbide-a review" , International Materials Reviews , 55, 2010, 4-44.
- 14- J. Yin, Z. Huang, X. Liu, Z. Zhang, D. Jiang , "Microstructure, mechanical and thermal properties of in situ toughened boron carbide-based ceramic composites co-doped with tungsten carbide and pyrolytic carbon" , Journal of the European Ceramic Society , 33, 2013, 1647-1654.
- 15- A. Abdollahi, M. Mashhadi , "Effect of B<sub>4</sub>C, MoSi<sub>2</sub>, nano SiC and micro-sized SiC on pressureless sintering behavior, room-temperature mechanical properties and fracture behavior of Zr(Hf)B<sub>2</sub>-based composites" , Journal of the European Ceramic Society , 40, 2014, 10767-10776.
- 16- G.S. Upadhyaya, Powder Metallurgy Technology, Cambridge International Science Publishing, 2002.
- 17- F.V. Lenel, Powder Metallurgy- Principles and Applications, Metal Powder Industries Federation, 1980.
- 18- A. Hassani, A. Habibolahzadeh, H. Bafti , "Production of graded aluminum foams via powder space holder technique" , Materials and Design , 40, 2012, 510-515.
- 19- H. Bafti, A. Habibolahzadeh , " Compressive properties of aluminum foam produced by powder-Carbamide spacer route" , Materials and Design , 52, 2013, 404-411.
- 20- R.M. German, Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing, Metal Powder Industries Federation, 2005.



- 21- B. Arifvianto, J. Zhou , "Fabrication of Metallic Biomedical Scaffolds with the Space Holder Method" , Materials , 7, 2014, 3588-3622.
22. C.F. Li, Z.G. Zhu, T. Liu , "Microhardness of pore walls in porous titanium prepared with novel powder metallurgy", Powder Metall , 48, 2005, 237-240.
23. W. Niu, C. Bai, G. Qiu, Q. Wang, L. Wen, D. Chen, L. Dong , "Preparation and characterization of porous titanium using space-holder technique" , Rare Met , 28, 2009, 338-342.
- 24- S. BazzazBonabi, J. KahaniKhabushan, R. Kahani, A. Hona,rbakhshRaouf , "Fabrication of metallic composite foam using ceramic porous spheres Light Expanded Clay Aggregate via casting process" , Materials and Design , 64, 2014, 310-315.
- 25- Y.Y. Zhao, F. Han, T. Fung , "Optimisation of compaction and liquid-state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams" , Materials Science and Engineering A , 364, 2004, 25-117.
- 26- J. Banhart, J. Baumeister , "Deformation characteristics of metal foams" , Journal of Materials Science , 33, 1988, 1431-1440.
- 27- B.P. Neville, A.Rabiei , "Composite Metal Foams processed through Powder Metallurgy" , Materials and Design , 29, 2008, 388-396.
- 28- W. Deqing, S. Ziyuan , "Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam" , Materials Science and Engineering A , 361, 2003, 45-49.
- 29- N. Chawla, K.K. Chawla , Metal matrix composites, New York, Springer Science +Business Media, 2006.

## A study on the effect of volume fraction of the nanoparticles boron carbide ( $B_4C$ ) on Nano-composite Al- $B_4C$ foam produced by powder metallurgy-space holder technique

**Mohammad Reza Moradi\*, Ahmad Moloodi, Ali Habibolahzadeh**

*\*Corresponding Author Address: Department of Metallurgy and Materials Science, Semnan University, Semnan, Iran and (ACECR), Mashhad Branch, Iran.*

*Corresponding Author E-mail (mohammadreza.moradi@semnan.ac.ir)*

### Abstract

In this research, the aluminum matrix Nano-composite foam reinforced by nanoparticles boron carbide ( $B_4C$ ), with different percentages of volume's reinforcer, containing; 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5 produced by utilizing the powder metallurgy-space holder technique. The space holder in this research is carbamide particle ( $(NH_2)_2CO$ ) in spherical shape and the particles sizes selected between 2-2.3 mm. The effect of increasing the volume fraction of nanoparticles ( $B_4C$ ) has been evaluated on the mechanical behavior and the compaction pressures and the optimal quantity of these parameters are determined. In addition, some determined numeric quantities of these parameters are also compared with the monolithic aluminum foam. In result it has been received that by raising the volume fraction of nanoparticles ( $B_4C$ ) from 0.5 to 2 volume percent, the amount of energy absorbtion of the sample would increase from  $9.74 \text{ MJ/m}^3$  to  $11.47 \text{ MJ/m}^3$  but in cases more than 2 volume percent would decrease. The amount of yield strength in a sample would also increase from 19.10 MPa to 23.90 MPa but in cases more than 2 volume percent has not changed. By raising the volume fraction of nanoparticles ( $B_4C$ ) from 0.5 to 2.5 volume percent, compression optimum pressure increased from 310 MPa to 370 MPa.

**Keywords:** Nano-composite foam, Compaction pressures, Space holder, Energy absorbtion.